
Influence of Additive Manufacturing Parameters by FFF on PLA Tensile Strength

Influência dos Parâmetros de Manufatura Aditiva por FFF na Resistência à Tração do PLA

Received: 21-07-2024 | Accepted: 25-08-2024 | Published: 31-08-2024

Camila Colombari Bomfim

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6262-1571>
Faculdade Metropolitana – FAMEF/FAMEESP, Brasil
E-mail: colombari.camila@gmail.com

Antônio Carlos Marangoni

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9463-9830>
Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Brasil
E-mail: antonio.marangoni@uemg.br

André Diniz Rosa da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9455-7488>
Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Brasil
E-mail: andre.rosa@uemg.br

João Pedro Silva Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7767-9915>
Faculdade Metropolitana – FAMEF/FAMEESP, Brasil
E-mail: jpsilvagarcia@outlook.com

Omar José de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5230-440X>
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil
E-mail: omarjlma@yahoo.com.br

Rafael Junqueira Marangoni

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3560-2691>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: rafaeljmarangoni@usp.br

ABSTRACT

When an object manufactured by 3D printing goes from prototype to a functional component, it is crucial to understand the mechanical properties of the material used. This knowledge determines the resistance limits of the object. Therefore, the objective of this research was to comparatively analyze the results obtained in tensile tests of specimens constructed with polylactic acid (PLA), printed in 3D, keeping the density constant and varying two construction parameters: the layer thickness and the geometry of the internal filling. The test specimens were made on a BFB Touch – Dual head-smoke 3D printer, in accordance with ASTM D638-14. Tensile tests were carried out using an EMIC model DL10000 testing machine, and the results were statistically analyzed for comparison. The results indicated that the maximum stress and fracture resistance increased with increasing thickness of the filament deposited by the extruder nozzle. Although PLA is often described in the literature as a brittle polymer, it has exhibited ductility characteristics when 3D printed, due to the alignment of fibers during the manufacturing process.

Keywords: 3D printing; Additive Manufacturing; Manufacturing with Cast Filament; Polylactic Acid; Tensile Test.

RESUMO

Quando uma peça manufaturada por impressão 3D passa de protótipo a componente funcional, é crucial o domínio das propriedades mecânicas do material utilizado. Este conhecimento determina os limites de resistência do objeto. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi analisar comparativamente os resultados obtidos em ensaios de tração de corpos de prova construídos com ácido polilático (PLA), impressos em 3D, mantendo a densidade constante e variando dois parâmetros de construção: a altura de camada e a geometria do preenchimento interno. Os corpos de prova foram feitos em uma impressora BFB Touch – Dual head-smoke, conforme a norma ASTM D638-14. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio EMIC modelo DL10000, e analisados estatisticamente para comparação. Os resultados indicaram que a tensão máxima e a resistência à fratura aumentaram com o aumento da altura de camada. Embora o PLA seja frequentemente descrito na literatura como um polímero frágil, ele exibiu características de ductilidade quando impresso em 3D, devido ao alinhamento das fibras durante o processo de fabricação.

Palavras-chave: Ácido Polilático; Ensaio de Tração; Fabricação com Filamento Fundido; Impressão 3D; Manufatura Aditiva.

INTRODUÇÃO

Para escolher o material adequado dentre uma vasta gama disponível, diversos aspectos são considerados primordiais. O custo econômico desempenha um papel crucial, influenciando diretamente o preço final do produto. Além disso, são levadas em consideração as condições ambientais às quais o projeto estará exposto, determinando as propriedades mecânicas necessárias para evitar deformações excessivas e fraturas, resistindo aos esforços mecânicos aos quais será submetido (Callister Júnior; Rethwisch, 2012).

Segundo Askeland e Phulé (2008), as propriedades mecânicas são definidas como o comportamento de um material sólido quando sujeito a tensões e deformações. Essas propriedades são influenciadas tanto pela estrutura interna do material quanto pela sua composição química, e são avaliadas através de testes mecânicos controlados, chamados de ensaios mecânicos, como mencionado por Cassu e Felisbert (2005). Fatores físicos relevantes incluem o tipo de carga aplicada, que pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, e a duração dessa carga, sendo o ensaio de tração um dos mais comuns (Callister Júnior; Rethwisch, 2012).

O ensaio de tração envolve a aplicação gradual de uma carga uniaxial em um corpo de prova padronizado. Esse procedimento é destrutivo, pois visa determinar a resistência máxima do corpo de prova sob essas condições, fornecendo dados quantitativos que permitem o entendimento do comportamento mecânico do material. Entre as características que podem ser avaliadas estão o limite de resistência à tração, o

limite de escoamento, o módulo de elasticidade, o módulo de resiliência, o módulo de tenacidade, o coeficiente de encruamento, o coeficiente de resistência, além de parâmetros relacionados à ductilidade como o alongamento (Garcia; Spim, 2012).

Para realizar o ensaio de tração, o corpo de prova é colocado entre duas garras. Na maioria dos equipamentos, a garra superior é conectada a uma barra fixa e a uma célula de carga. A garra inferior é fixada a uma barra móvel que aplica uma tração gradual ao material. A célula de carga registra a força aplicada, enquanto um extensômetro monitora o alongamento da amostra (Garcia; Spim, 2012).

Segundo Askeland e Phulé (2008), durante a realização de um ensaio de tração, os dados registrados incluem a relação entre a carga aplicada e a variação no comprimento do corpo de prova, que é denominada deformação. Para aplicar os resultados de um teste de tração de um determinado corpo de prova a outros objetos do mesmo material, de diferentes tamanhos e seções transversais, é necessário converter a carga em tensão e o alongamento total do corpo de prova em deformação. Essa conversão é necessária porque tensão e deformação são propriedades do material, enquanto força e alongamento são características do componente.

Askeland e Phulé (2008) explicitam que pode-se converter a carga em tensão e o alongamento total do corpo de prova em deformação através da Equação 1 e da Equação 2 apresentadas a seguir, sendo A_0 a seção transversal inicial do corpo de prova, anteriormente ao início do ensaio; l_0 a distância inicial entre marcas de referência, feitas para medir o alongamento do corpo de prova; Δl a variação de comprimento sob a força aplicada F , e a deformação e σ a tensão.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

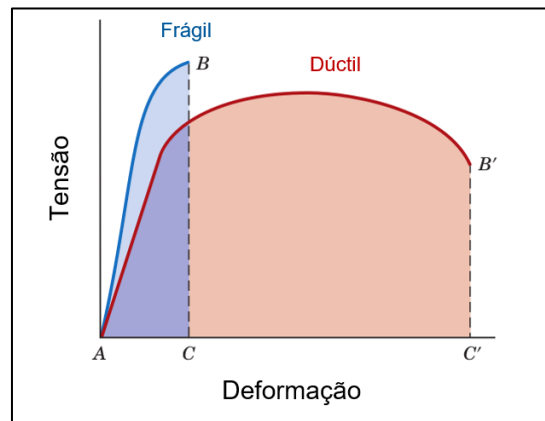
$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

A variação do comprimento do objeto em resposta à força aplicada é então representada graficamente como uma curva de "tensão-deformação" de engenharia (Garcia; Spim, 2012).

Os materiais são geralmente categorizados como frágeis ou dúcteis, dependendo da capacidade de deformação plástica que podem desenvolver até a fratura do corpo de prova. Quando a deformação plástica é mínima ou não ocorre significativamente (deformação de fratura menor que aproximadamente 5%), o material é classificado como frágil. Por outro lado, se o material pode sofrer uma deformação plástica substancial antes

da fratura, é considerado dúctil (Callister Júnior; Rethwisch, 2012). As características dos comportamentos tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis estão apresentadas comparativamente na Figura 01.

Figura 01: Comportamentos de tensão-deformação para materiais dúcteis e frágeis.



Fonte: Callister Júnior, Rethwisch (2012).

A tensão máxima alcançada durante um ensaio de tração é conhecida como limite de resistência à tração, que representa o pico na curva tensão-deformação de engenharia. Em materiais dúcteis, porém, a tensão de ruptura ocorre a um valor inferior ao limite de resistência à tração, devido ao fenômeno conhecido como empescoçamento. O empescoçamento é caracterizado pela redução da seção transversal do corpo de prova antes da sua ruptura durante o ensaio de tração. Conforme a seção transversal diminui, a força necessária para continuar a deformação também diminui, resultando na queda da tensão de engenharia (Askeland; Phulé, 2008).

Segundo Newell (2010), para assegurar a uniformidade dos resultados em testes de tração realizados por diferentes laboratórios, é essencial aderir a normas específicas durante sua condução. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) desenvolveu várias normas técnicas que regulam esses testes, definindo terminologia, metodologia, a importância do teste, detalhes do equipamento utilizado, preparação dos corpos de prova, calibração do equipamento, velocidade de teste, controle ambiental e outros procedimentos experimentais. A norma técnica ASTM D638-14 estabelece o método padrão para avaliar as propriedades de tração de materiais poliméricos comumente conhecidos como plásticos.

Gere e Goodno (2010) destacam que, apesar da baixa resistência a altas temperaturas, vários polímeros com diversas propriedades mecânicas têm sido empregados em projetos estruturais devido à sua leveza e excelente resistência à corrosão.

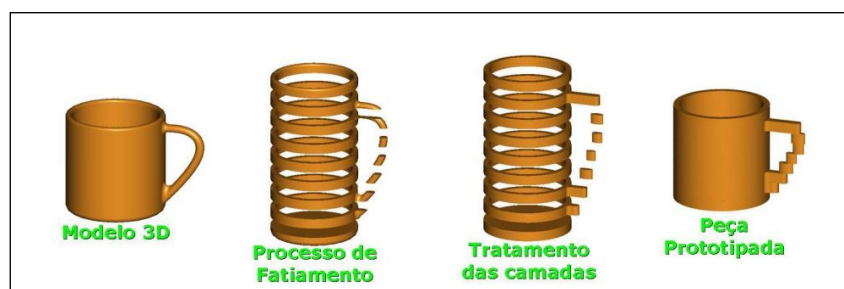
Nos últimos dez anos, um dos polímeros mais estudados é o *Polylactic Acid* (PLA), um biopolímero sintético conhecido por suas propriedades termoplásticas, semicristalinas ou amorfas, além de ser biodegradável, biocompatível, compostável, reciclável e não tóxico. Suas características são semelhantes às dos polímeros derivados do petróleo e é produzido por síntese química do ácido lático, obtido através da fermentação bacteriana de amido ou glicose de fontes renováveis como mandioca, milho, batata e cana-de-açúcar (Wang et al., 2008).

O PLA apresenta boas propriedades mecânicas, como alta resistência e rigidez à temperatura ambiente, o que o torna uma alternativa viável para substituir polímeros convencionais derivados do petróleo. No entanto, seu uso em larga escala ainda é limitado devido ao custo elevado e à fragilidade (James, 1998).

No campo da manufatura aditiva através da fabricação por filamento fundido (FFF), o PLA é o filamento mais amplamente utilizado devido à sua facilidade superior de impressão em comparação com os outros materiais utilizados por essa tecnologia, além de estar disponível em uma variedade de cores (Barnatt, 2014).

Segundo Volpato (2007), a manufatura aditiva é definida como um processo de fabricação que utiliza a adição de material em camadas planas sucessivas, conforme ilustrado na Figura 02.

Figura 02: Princípio de manufatura aditiva.



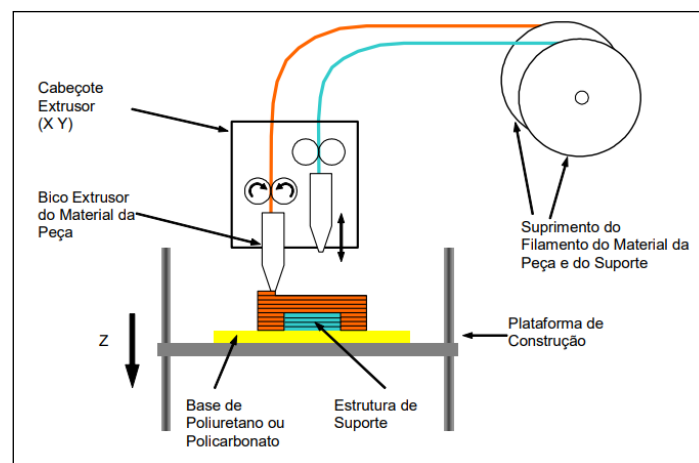
Fonte: Volpato (2007).

Em todos os processos de manufatura aditiva, o modelo 3D é inicialmente criado utilizando um sistema CAD (*Computer Aided Design*, ou Projeto Auxiliado por Computador, em português) e, em seguida, é fatiado antes de transferir os dados para a

tecnologia responsável pela construção física do objeto. Após o projeto do modelo tridimensional em um sistema CAD, o modelo é convertido para um formato padrão através do processo de aproximação por faces planas, conhecido como STL (*Standard Tessellation Language*). Após a conversão para o formato STL, segue-se o processo de fatiamento com o auxílio de um *software* fatiador, onde planos horizontais são transformados em camadas fechadas ou poligonais. Essas informações são então transferidas para o equipamento de manufatura aditiva (Volpato, 2007).

Utilizando a técnica da extrusão, as tecnologias de manufatura aditiva através da fabricação por filamento fundido (FFF), também conhecidas como impressoras 3D, consistem na adição de material na forma de filamento polimérico extrudado e aquecido, em estado semilíquido. A construção é realizada por um cabeçote de extrusão que se move nos planos X-Y, enquanto uma plataforma se desloca no eixo Z, ajustando-se à espessura da camada depositada após cada ciclo. A câmara da máquina deve ser mantida em temperatura inferior à do material sendo depositado, permitindo que ele endureça rapidamente ao entrar em contato com a camada anterior (Volpato, 2007). O processo de FFF é esquematicamente representado na Figura 03.

Figura 03: Funcionamento da tecnologia FFF.



Fonte: Volpato (2007).

A tecnologia de impressão 3D possibilita a fabricação de objetos personalizados, expandindo seu uso nos últimos anos para a produção de itens de uso imediato. Essa tecnologia permite a personalização dos produtos conforme as preferências individuais, oferece complexidade estrutural interna superior à obtida por meio de peças fundidas ou moldadas, promove sustentabilidade ao reduzir o desperdício de material em comparação

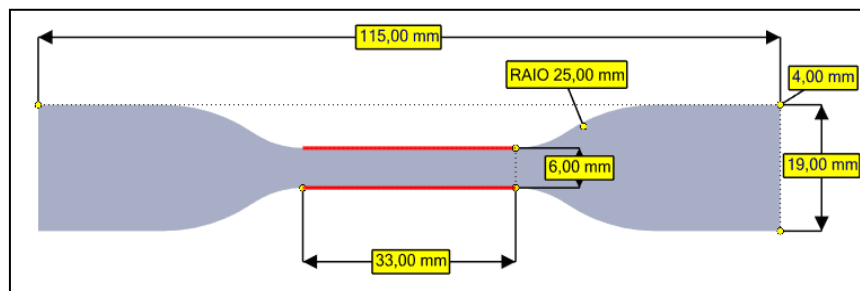
a outros processos de fabricação, resultando em economia de capital. Além disso, viabiliza o uso de polímeros biodegradáveis na produção e proporciona economia significativa na produção em escala, permitindo a criação de itens com custos reduzidos em comparação aos métodos tradicionais de fabricação em larga escala, visto que as peças podem ser construídas com diferentes estruturas de preenchimento interno, ou seja, não há a obrigatoriedade de as peças serem maciças (Hausman; Horne, 2014).

Assim, é fundamental compreender e quantificar as propriedades mecânicas do PLA submetido às diferentes variáveis de construção permitidas através do método de fabricação com filamento fundido (FFF), visando garantir não apenas a produção de protótipos, mas também de peças funcionais. Para avaliar essas propriedades, esta pesquisa investiga se variáveis de impressão 3D “altura de camada” e “geometria de preenchimento interno” influenciam nos resultados obtidos após a realização de ensaios de tração em corpos de prova construídos com PLA.

METODOLOGIA

Os corpos de prova foram projetados e dimensionados no software *Solidworks*® (versão 2014), de acordo com os padrões estabelecidos pela norma ASTM D638-14, que regulamenta os testes de tração e compressão para materiais plásticos. As dimensões específicas dos corpos de prova utilizados, conforme definido pela norma, estão ilustradas na Figura 04.

Figura 04: Corpo de prova dimensionado de acordo com a norma ASTM D638-14.



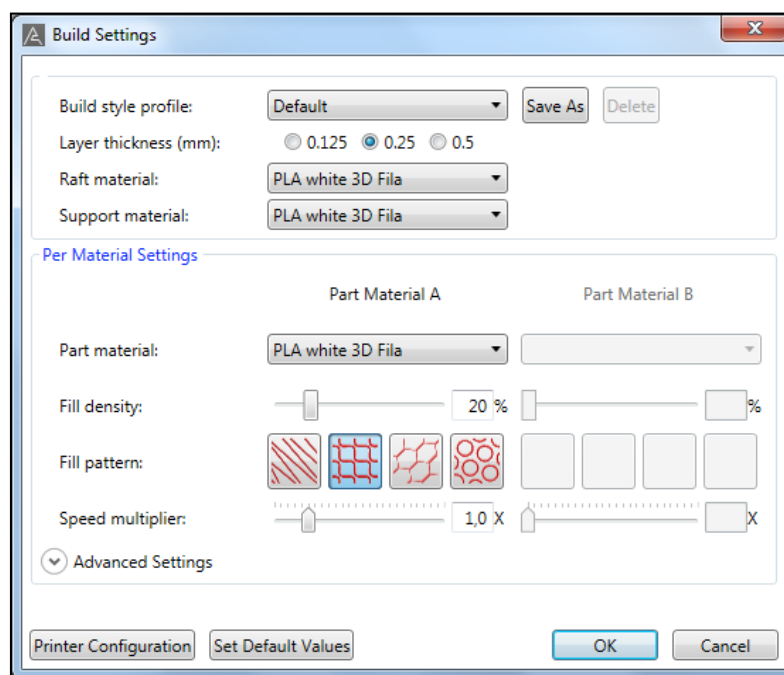
Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Na sequência, o modelo tridimensional do corpo de prova foi convertido em um formato padrão por meio do processo de aproximação por faces planas, denominado

“STL” (*Standard Tessellation Language*). A conversão é necessária para que o modelo tridimensional seja lido pelo *software* fatiador.

O *software* fatiador utilizado nessa pesquisa é o Axon 3.0®. O Axon é um *software* fatiador específico para impressoras da marca BFB (*Bits from Bytes*®), e permite que os usuários transformem um arquivo de formato STL em um conjunto de comandos para controle do equipamento. Os parâmetros de altura de camada, bem como a composição geométrica interna dos corpos de prova foram parametrizadas *software* mencionado, cuja interface está ilustrada na Figura 05.

Figura 05: Interface do *software* Axon 3.0®.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

No *software*, como mostrado na Figura 02, é possível definir previamente a altura de camada (*layer thickness*), a densidade de preenchimento (*fill density*), a geometria do preenchimento interno (*fill pattern*) e a velocidade de impressão (*speed multiplier*). Nesta pesquisa, a densidade de preenchimento foi mantida fixa em 90% e a velocidade de impressão padrão da impressora 3D foi utilizada (1,0 x). Os campos "*raft material*", "*support material*" e "*part material*" estão relacionados às características do material fornecido, como a temperatura de fusão do filamento e sua viscosidade, e foram padronizados conforme as orientações do fornecedor do filamento utilizado.

Três alturas de camada foram avaliadas, sendo 0,125 mm, 0,250 mm e 0,500 mm, juntamente com quatro tipos de estruturas de preenchimento interno: linear, treliça, hexagonal e cilíndrica, conforme ilustrado na Figura 02. A combinação dessas variáveis resultou em doze configurações distintas. Portanto, as possibilidades de impressão, também referidas como "tipos de impressão" ou "configurações de impressão", estão detalhadas no Quadro 01.

Quadro 01: Variáveis físicas das configurações de impressão dos corpos de prova construídos por impressão 3D por extrusão para densidade de 90%.

	0,125mm	0,250mm	0,500mm	Linear	Treliça	Hexagonal	Cilíndrica
01							
02							
03							
04							
05							
06							
07							
08							
09							
10							
11							
12							

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

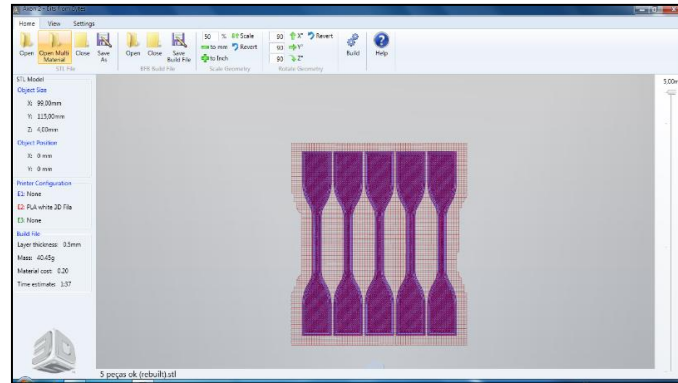
O *software Axon 3.0*® converte o arquivo com extensão *SWG* do *Solidworks*® para o formato *STL*. Em seguida, o *software* realiza o processo de fatiamento e gera um arquivo na extensão *BFB*, contendo as trajetórias de impressão, que é decodificado pela impressora 3D. Os corpos de prova foram prototipados simultaneamente em grupos de cinco para agilizar o processo de impressão.

Após a seleção dos parâmetros de impressão no *software*, o resultado é um arquivo de impressão que inclui o número de camadas de impressão definidas pelo processo de fatiamento, além de um relatório detalhando o tempo de impressão em segundos e a massa em gramas necessária para a construção dos corpos de prova. Na Figura 06, observa-se o arquivo de impressão no formato *BFB*, já com a base de apoio para os corpos de prova.

Para cada configuração apresentada no Quadro 01, foram prototipados dez corpos de prova seguindo a norma ASTM D638-14, totalizando 120 corpos de prova. Os corpos de prova foram impressos em PLA branco, utilizando filamentos do mesmo lote fornecido pela 3D FILA, a uma temperatura de 220°C, em um ambiente sem ventilação. A

construção foi realizada em uma impressora 3D modelo *BFB Touch – Dual head-smoke*®.

Figura 06: Interface do *Software Axon 3.0*® após conversão para *BFB*.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Os resultados das impressões são exemplificados na Figura 07. Após a conclusão do processo de impressão 3D, foi necessário separar os corpos de prova individualmente e remover a base de suporte utilizada para a aderência dos objetos finais.

Figura 07: Exemplos de resultado da impressão 3D.

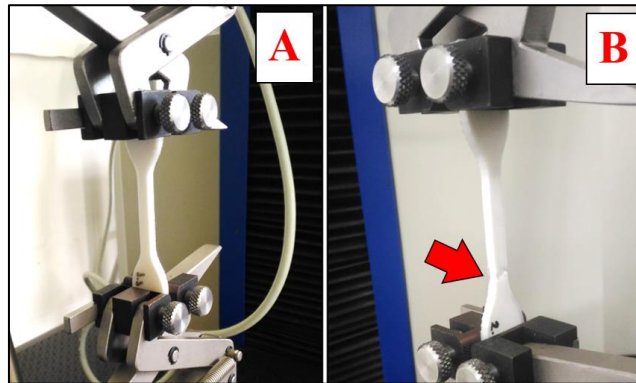


Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Seguindo as especificações da norma ASTM D638-14, com uma velocidade de 5 mm/min, cada um dos 120 corpos de prova foi submetido ao ensaio de tração utilizando a máquina universal de ensaio EMIC, modelo DL10000.

Os corpos de prova que sofreram danos em qualquer etapa anterior aos ensaios ou que romperam fora da região apropriada, conforme as orientações da norma ASTM D638-14, foram descartados. As Figuras 08 ilustra o processo de ensaio dos corpos de prova.

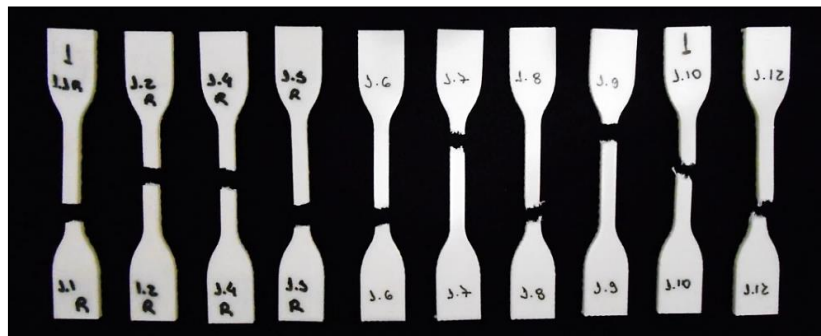
Figura 08: Em A, observa-se um corpo de prova antes da realização do ensaio. Em B, observa-se o corpo de prova após o ensaio, com a fratura indicada pela seta vermelha.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 09 apresenta os corpos de prova de configuração de impressão 01 após os ensaios, e exemplifica o estado após o ensaio de tração dos corpos de prova cujos dados serão analisados nessa pesquisa.

Figura 09: Corpos de prova de configuração de impressão 01 rompidos após ensaio de tração.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Para cada ensaio realizado, a máquina de tração gerou um relatório gráfico com os dados obtidos, incluindo o tempo total do ensaio em segundos, a deformação em milímetros e a força em newtons.

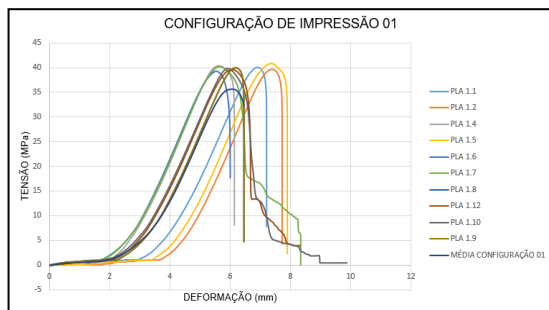
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão dos ensaios, os dados gerados pela máquina de ensaio de tração foram exportados, incluindo a deformação em milímetros e a força em newtons. Para calcular a tensão aplicada em cada instante do ensaio, a força foi dividida pela área do corpo de prova, de 26,7 mm². Na sequência, foram plotados os gráficos tensão-

deformação para cada ensaio, utilizando o *software Origin®*, desenvolvido pela *Originlab*. Por fim, as curvas de tensão-deformação foram organizadas conforme cada configuração de impressão definida no Quadro 01.

Cada gráfico contém, além das dez curvas dos ensaios realizados, uma décima primeira curva, representando a média estatística do comportamento da configuração analisada. A Figura 10 apresenta as curvas de tensão-deformação obtidas para os ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 01. O Quadro 02 explicita os resultados obtidos após a análise dos gráficos dessa configuração de impressão.

Figura 10: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 01.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

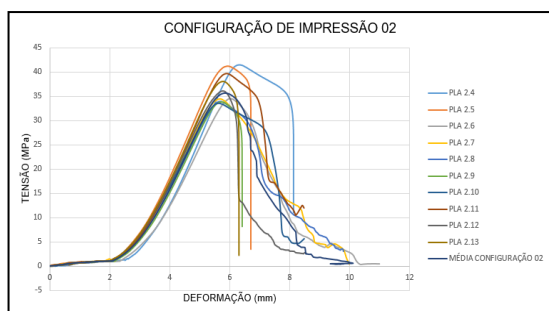
Quadro 02: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 01.

CORPO DE PROVA TIPO 01 (0,125 mm/preenchimento linear)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	967,1
Deformação (mm)	6,7
Tensão máxima (MPa)	35,7
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,5

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 11 ilustra as curvas tensão-deformação obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova com a configuração de impressão 02. O Quadro 03 detalha os resultados obtidos após a análise dos gráficos dessa configuração de impressão.

Figura 11: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 02.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

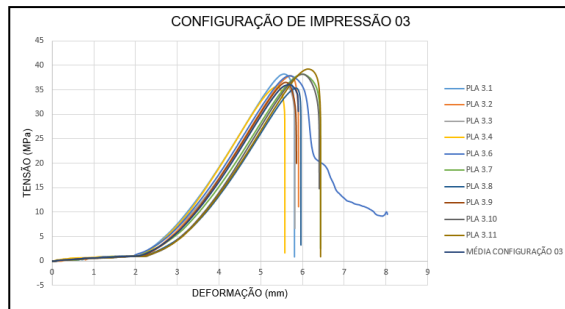
Quadro 03: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 02.

CORPO DE PROVA TIPO 02 (0,125 mm/preenchimento treliça)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	964,4
Deformação (mm)	6,6
Tensão máxima (MPa)	35,6
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,5

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 12 mostra as curvas de tensão-deformação para os corpos de prova testados com a configuração de impressão 03. Os resultados da análise desses gráficos são apresentados no Quadro 04.

Figura 12: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 03.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

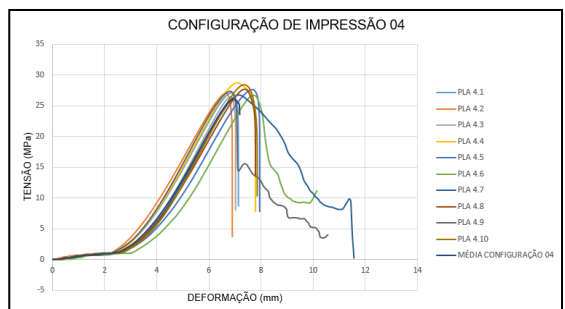
Quadro 04: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 03.

CORPO DE PROVA TIPO 03 (0,125 mm/preenchimento hexagonal)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	975,2
Deformação (mm)	5,9
Tensão máxima (MPa)	36,0
Massa de 01 corpo de prova (g)	7,9

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

As curvas de tensão-deformação para os ensaios dos corpos de prova com a configuração de impressão 04 estão apresentadas na Figura 13. Os resultados da análise desses gráficos são detalhados no Quadro 05.

Figura 13: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 04.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

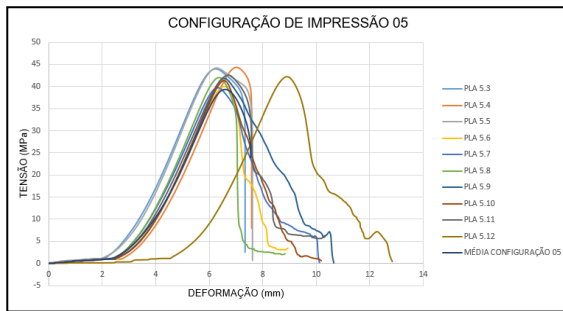
Quadro 05: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 04.

CORPO DE PROVA TIPO 04 (0,125 mm/preenchimento cilíndrico)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	704,3
Deformação (mm)	7,2
Tensão máxima (MPa)	26,0
Massa de 01 corpo de prova (g)	6,0

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 14 mostra as curvas de tensão-deformação resultantes dos ensaios dos corpos de prova com a configuração de impressão 05. O Quadro 06 detalha os resultados obtidos a partir desses gráficos.

Figura 14: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 05.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

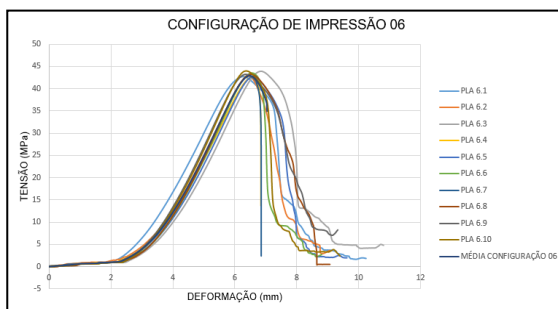
Quadro 06: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 05.

CORPO DE PROVA TIPO 05 (0,250 mm/preenchimento linear)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1.067,4
Deformação (mm)	7,6
Tensão máxima (MPa)	39,4
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,0

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 15 apresenta as curvas de tensão-deformação dos ensaios realizados nos corpos de prova com a configuração de impressão 06. Os resultados dessa análise são detalhados no Quadro 07.

Figura 15: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 06.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

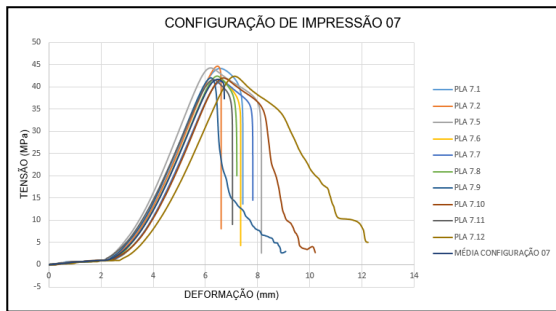
Quadro 07: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 06.

CORPO DE PROVA TIPO 06 (0,250 mm/preenchimento treliça)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1.162,2
Deformação (mm)	7,0
Tensão máxima (MPa)	42,9
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,0

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 16 ilustra as curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios dos corpos de prova com a configuração de impressão 07. Os resultados da análise desses gráficos estão detalhados no Quadro 08.

Figura 16: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 07.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

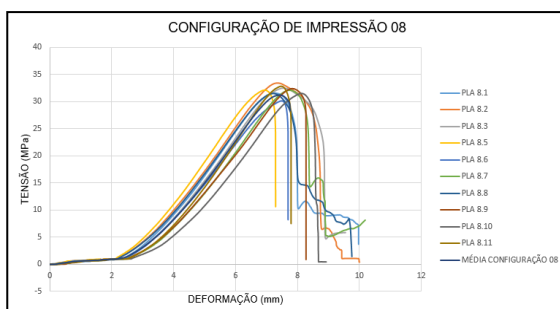
Quadro 08: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 07.

CORPO DE PROVA TIPO 07 (0,250 mm/preenchimento hexagonal)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1129,7
Deformação (mm)	6,7
Tensão máxima (MPa)	41,7
Massa de 01 corpo de prova (g)	7,4

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

As curvas de tensão-deformação obtidas para os ensaios dos corpos de prova com a configuração de impressão 08 são apresentadas na Figura 17. Os resultados dessa análise são detalhados no Quadro 09.

Figura 17: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 08.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

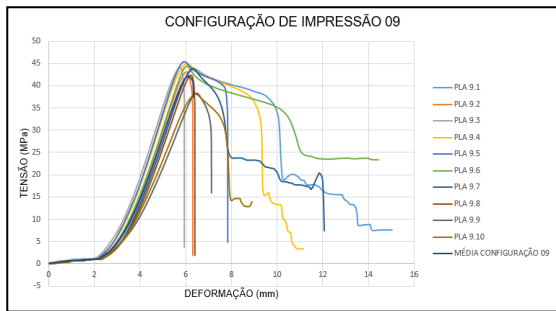
Quadro 09: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 08.

CORPO DE PROVA TIPO 08 (0,250 mm/preenchimento cilíndrica)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	845,2
Deformação (mm)	7,8
Tensão máxima (MPa)	31,2
Massa de 01 corpo de prova (g)	5,6

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 18 exibe as curvas de tensão-deformação dos ensaios realizados nos corpos de prova com configuração de impressão 09. Os resultados dessa análise são descritos no Quadro 10.

Figura 18: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 09.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

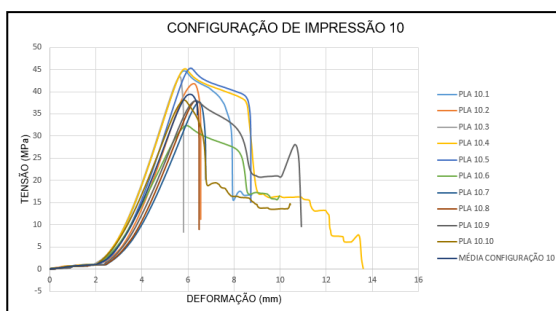
Quadro 10: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 09.

CORPO DE PROVA TIPO 09 (0,500 mm/preenchimento linear)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1.140,5
Deformação (mm)	6,3
Tensão máxima (MPa)	42,10
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,1

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Os resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 10 são apresentados na Figura 19 através das curvas de tensão-deformação. Os detalhes desta análise estão descritos no Quadro 11.

Figura 19: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 10.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

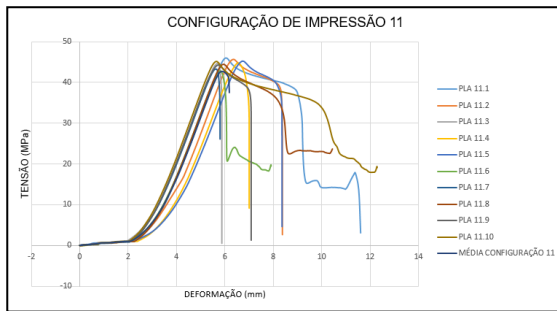
Quadro 11: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 10.

CORPO DE PROVA TIPO 10 (0,500 mm/preenchimento treliça)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1.070,0
Deformação (mm)	6,4
Tensão máxima (MPa)	39,5
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,1

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Os dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 11 são mostrados na Figura 20 por meio das curvas de tensão-deformação. A análise completa desses resultados está detalhada no Quadro 12.

Figura 20: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 11.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

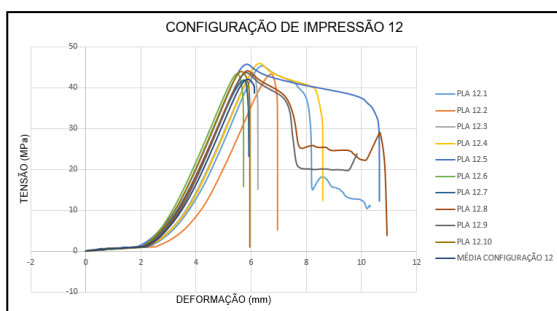
Quadro 12: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 11.

CORPO DE PROVA TIPO 11 (0,500 mm/preenchimento hexagonal)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1.156,7
Deformação (mm)	6,2
Tensão máxima (MPa)	42,7
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,1

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

A Figura 21 exibe as curvas de tensão-deformação dos ensaios realizados nos corpos de prova com configuração de impressão 12. Os detalhes da análise desses resultados estão apresentados no Quadro 13.

Figura 21: Resultados dos ensaios dos corpos de prova de configuração de impressão 12.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

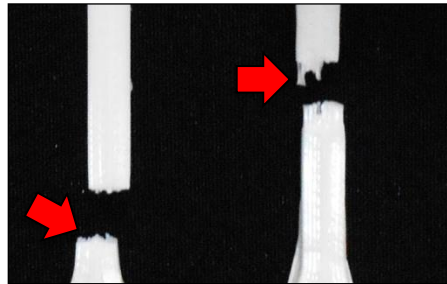
Quadro 13: Resultados para o corpo de prova de configuração de impressão 12.

CORPO DE PROVA TIPO 12 (0,500 mm/preenchimento cilíndrico)	
Área (mm ²)	26,7
Força máxima (N)	1.137,8
Deformação (mm)	6,1
Tensão máxima (MPa)	42,0
Massa de 01 corpo de prova (g)	8,1

Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Durante os ensaios realizados, observou-se que os corpos de prova não foram rompidos de maneira abrupta. Os corpos de prova são constituídos de filamentos de PLA que foram depositados de forma ordenada durante o processo de construção, o que resulta em um comportamento semelhante ao de fibras submetidas ao ensaio de tração. Em alguns corpos de prova, é evidente que o rompimento dos filamentos não ocorreu simultaneamente, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Rompimento não simultâneo dos filamentos dos corpos de prova.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

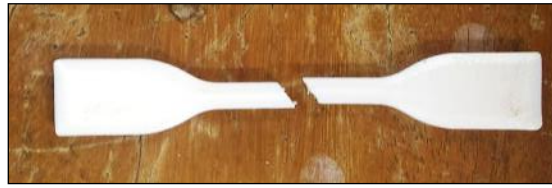
À medida que a altura de camada aumenta, também cresce a seção transversal de cada filamento no corpo de prova, exigindo maior tensão para sua ruptura. Isso resulta em corpos de prova que alcançam uma tensão máxima mais elevada em comparação com aqueles feitos com filamentos mais finos. Os gráficos e tabelas apresentados anteriormente evidenciam esse aumento.

Analisando a estrutura interna de preenchimento, verifica-se que os corpos de prova das configurações 04, 08 e 12 suportam menores tensões em comparação com outras estruturas de preenchimento interno, ou seja, a estrutura de preenchimento interno cilíndrica suporta menores tensões quando comparadas às outras configurações de preenchimento interno. Isso se deve à menor presença de fibras alinhadas na direção do ensaio de tração, exigindo menos tensão para a ruptura.

Quando a espessura do filamento é mantida constante e a variação causada pelo padrão de preenchimento interno é analisada, observa-se que a estrutura cilíndrica resulta na menor massa final de impressão. Para produções em larga escala, essa economia de material implica em redução de custos significativa. Portanto, em aplicações onde alta resistência à tração não é essencial, as configurações cilíndricas são mais vantajosas devido à economia proporcionada.

Em relação ao PLA, o mesmo é classificado na literatura como um material que apresenta características frágeis. A fratura observada nos corpos de prova se assemelha à fratura dos materiais frágeis, pois não apresenta redução de seção transversal na região de fratura, conforme ilustrado nas Figuras 09, 22 e 23. No entanto, os gráficos de tensão-deformação deste polímero mostram semelhanças com os de materiais dúcteis, indicando uma deformação significativa após atingir a tensão máxima (ou seja, com deformação de fratura superior a 5%).

Figura 23: Rompimento não simultâneo dos filamentos dos corpos de prova.



Fonte: Bomfim, Marangoni, Silva, Garcia, Lima, Marangoni (2024).

Os corpos de prova fabricados por impressão 3D contêm fibras internas que não se rompem abruptamente durante os ensaios. Esse rompimento gradual das fibras resulta na redução da área da seção transversal, diminuindo assim a força necessária para continuar a deformação e conseqüentemente reduzindo a tensão de ruptura. Esse comportamento aproxima o padrão gráfico do ensaio ao observado em materiais que possuem características de materiais dúcteis.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, é possível inferir que à medida que a espessura do filamento de impressão aumenta, tanto a tensão máxima quanto a resistência à fratura dos corpos de prova também aumentam. Em média, os corpos de prova com preenchimento cilíndrico demonstraram menor capacidade de suportar tensões em comparação com outras estruturas de preenchimento. Além disso, este tipo de estrutura apresentou massa final de impressão reduzida quando a espessura do filamento foi mantida constante, tornando-os mais econômicos para produção em larga escala.

O polímero PLA, embora frequentemente descrito na literatura como frágil, demonstra propriedades de ductilidade quando fabricado através de impressão 3D, devido à disposição das fibras durante o processo de construção.

O objetivo principal do estudo foi alcançado, uma vez que os resultados dos ensaios mecânicos de tração em corpos de prova, conforme norma ASTM 638-14 e fabricados por extrusão em impressora 3D, foram apresentados e analisados de forma comparativa. Essa análise foi realizada ao variar as características físicas, como a altura de camada e a disposição geométrica interna. O intuito foi determinar experimentalmente informações detalhadas sobre as propriedades mecânicas do PLA, visando auxiliar pesquisadores, indústrias e outros interessados na escolha do melhor custo-benefício para

diversas aplicações, levando em consideração aspectos econômicos e as condições de trabalho para evitar falhas estruturais.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

BARNATT, C. “**3D printing**”, Second Edition. Explainingthefuture.com, 306 p. 2014.

CALLISTER, Jr., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CASSU, Silvana N.; FELISBERTI, Maria I.; O comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Revista Química Nova**, São Paulo, vol. 28, no. 2, p. 255-263, fev. 2005.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365p.

GERE, J.M; GOODNO, B.J. **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

HAUSMAN, Kalani Kirk; HORNE, Richard. **3D Printing For Dummies**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 384 p.

JAMES, L. Large-scale production, properties and comercial applications of polylactic acid polymers. **Polym. Degrad. Stab.** 1998, 59, 145-152.

NEWELL, James. **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais**. Rio de Janeiro. LTC, 2010.

VOLPATO, Neri. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo. Edgar Blucher. 2007.

WANG, Ning. *et.al.* Influence of formamide and water on the properties of thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. **Carbohydrate Polymers**, v.71, p.109-118, 2008.